

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：13801
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K03832
研究課題名（和文）円筒面ターゲットと光てこによる5自由度微小運動計測用センサシステムの高感度化
研究課題名（英文）Sensitivity improvement for five-degree-of-freedom fine motions based on optical lever and cylindrically-shaped target
研究代表者
大岩 孝彰 (Oiwa, Takaaki)
静岡大学・工学部・教授
研究者番号：00223727
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：工作機械や超精密加工機に用いられる直線運動機構のアップ誤差を補正し、高い位置決め精度を達成するため、運動の真直度誤差や姿勢誤差をコンパクトに計測するためのレーザ光源と円筒ミラーから構成される多自由度運動誤差計測システムを考案した。研究期間内において、円筒ミラーの2自由度並進変位をレーザ光源および光位置検出素子（PSD）二組を用いて計測する実験を行い、 $\pm 20\mu\text{m}$ の範囲内で $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下の精度を得た。さらに精度を向上させるため、レーザ光射出角度の時間的変化をインプロセスで観測・補正を試みた。そのため、光路中に置かれたビームスプリッタおよび二次元PSDを設置し、補正効果について検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
加工機や計測機などの直交座標形機械システムでは、各移動軸内で位置決め方向のみのフィードバック制御が行われてきたが、機械の高精度化のためには残りの5方向の誤差すなわち運動の真直度誤差（2方向）や姿勢誤差（3方向）を計測する必要がある。一般的な工作機械では $10\mu\text{m}$ および数 $10\mu\text{rad}$ 程度の運動誤差が観察されるが、特に姿勢誤差の計測はアップ誤差の補正のために必須である。アンケート調査によれば超精密位置決め装置におけるアップの原理の順守率は年々悪化して非常に深刻な問題となっている。そこで近年、機械の運動精度向上のために運動の真直度誤差や姿勢誤差の計測ができる多自由度センサの研究が望まれている。

研究成果の概要（英文）：A multi-degree-of-freedom motion error measurement system consisting of laser light sources and cylindrical mirrors has been developed to compactly measure straightness and orientation errors of motion from one direction in order to compensate for Abbe errors in linear motion mechanisms used in machine tools and ultra-precision machining centers and to achieve high positioning accuracy. During the research period, experiments were conducted to measure the 2-DOF translational displacements of a single cylindrical mirror using two pairs of laser light spot light position sensitive device (PSD). Measurement accuracy of less than ± 0.5 micrometer within a range of ± 20 micrometer was obtained. In order to observe and correct the temporal changes in the laser beam emission direction in-process, a beam splitter and a two-dimensional PSD placed in the optical path were separately installed and the correction effect was verified.

研究分野：機械工学

キーワード：精密機械システム 多自由度微小運動計測 レーザ光 光てこ アップ誤差 位置検出素子

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

加工機や計測機などの直交座標形機械システムでは、各移動軸内で位置決め方向のみのフィードバック制御が行われてきた(図1)。機械の高精度化のためには、残りの5方向の誤差すなわち運動の真直度誤差(2方向)や姿勢誤差(3方向)を計測する必要がある。一般的な工作機械では $10\mu\text{m}$ および数 $10\mu\text{rad}$ 程度の運動誤差が観察されるが、特に姿勢誤差の計測はアップ誤差の補正のために必須である。そこで多自由度運動計測センサの研究が近年盛んになっており、上記の運動誤差の補正のためには $1\mu\text{m}$ および数 μrad オーダの精度で計測可能な多自由度微小運動計測センサが必要となる。図2は6本の変位センサを直交させた最も基本的な構成例であるが、複雑な幾何形状を持つ高精度なセンサターゲットや広い設置スペースを要する。またレーザ光の干渉や回折を利用した多自由度センサでは複雑な光学部品が多数必要となる。さらに空気の揺らぎ、外乱振動等の耐環境性が低いという問題もある。

2. 研究の目的

レーザ光源と光位置検出器を複数台用い、図3のように凸面を持つセンサターゲットを計測することにより、空間内の物体の微小な多自由度運動(並進および姿勢変化)の非接触計測が可能でギャップセンサシステムについての基礎的研究を行う。計測精度の数値的目標は $1\mu\text{m}$ および数 μrad オーダを目指す。このような多自由度センサシステムが実現すれば、今まで位置決め方向のみの変位フィードバックしか行っていなかった直線運動機構の残りの5方向の運動誤差を計測・補正でき、特にアップ誤差が補正可能になるため機械システムの飛躍的な高精度化が達成できる。

3. 研究の方法

図4はレーザ光源と位置検出素子(PSDなど)2組を用いて平面ターゲットのYZ方向すなわち二次元変位計測を行っているが、ターゲットの変位とPSDで検出されるレーザ反射光の位置変位はほぼ等値であり、この原理での計測精度や分解能はPSDのそれとほぼ同等となるため、高性能化には限界がある。しかしターゲットが図5のように凸面の場合、入射角が大きくなれば反射角も大となる、つまり「光てこ」の原理で高い変位計測感度が得られ、図6ではYZ変位の高分解能測定が可能となる。

4. 研究成果

令和3年度は、まず光線が円筒状のミラーで反射した際の光の軌跡を幾何光学的に求め、入射角や光源および受光素子の設置位置等に関するパラメータの最適化を行った。結果、ターゲットの変位が光の入射方向にある場合は感度が拡大されないこと、図6のように2組の光軸を 90° となるように配置することにより並進二方向の計測感度が等方化できることを見出した。

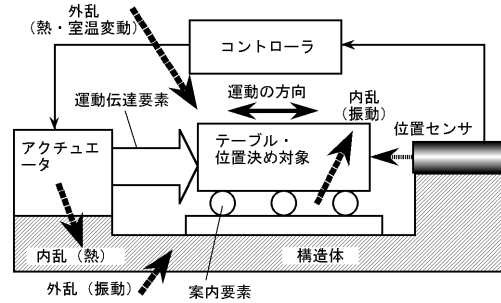


図1 直線運動位置決め装置の一般的構成(大岩, 機械設計, 64巻9号(2020) pp.2-8)

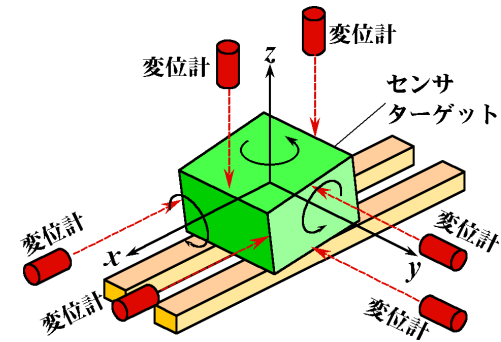


図2 直線運動機構の6自由度運動を計測するための6本の変位計の一般的な配置例

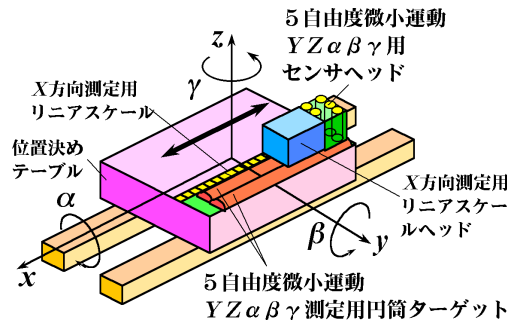


図3 (本計画での)位置決め装置のための円筒ミラーを用いた5自由度運動誤差計測のイメージ

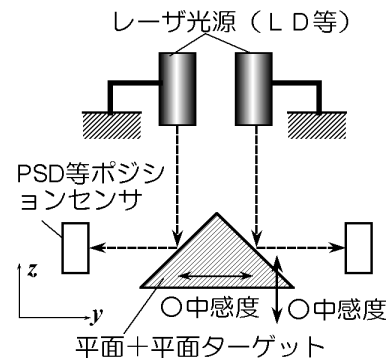


図4 平面ターゲットによる二次元変位計測

図6のように2組の光軸を 90° となるように配置することにより並進二方向の計測感度が等方化できることを見出した。

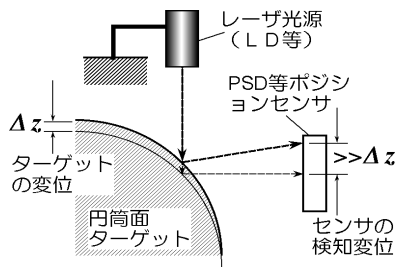


図5 円筒面ターゲットでは変位が拡大される

次に図7のような装置を組立て、円筒ミラーと光源・二分分割フォトダイオードを2組用いてYおよびZ方向並進2方向の微小変位計測実験を行った。結果、 $\pm 12\mu\text{m}$ の測定範囲内でYおよびZ方向の微小変位計測が可能であることを確認した。測定誤差はY方向で $4.4\mu\text{m}$ およびZ方向に $3.0\mu\text{m}$ 程度であった。以上のように2自由度並進変位測定時に6%~9%程度の変位非線形誤差が観察された。

令和4年度は、フォトディテクタに入射するレーザー光強度や線幅の変化の影響を排除するため、前年度までの線状レーザー光源および二分分割フォトダイオードに変えて、スポットレーザー光およびフォトダイオードの表面抵抗を利用した非分割形の受光素子である二次元PSDを採用した。YおよびZ方向の二次元変位計測実験を行った結果、図8に示すように $\pm 20\mu\text{m}$ の測定範囲内で非線形誤差は $1\mu\text{m}$ 以下となり、変位計測精度が飛躍的に向上した。

本計測手法では、フォトディテクタ上のレーザースポットの位置安定性が重要となるが、市販の半導体レーザーでは内部の温度上昇により、射出角度には $10\mu\text{rad}$ 程度の変動が予測される。そこで令和5年度は、レーザー光の射出方向が時間経過や室温変動などにより変化することをインプロセスで観測・補正するために、光路中に置かれたビームスプリッタおよび二次元PSDを別途図9のように設置した。さらにこのPSDでのレーザースポット変位を高感度で検出するためにビーム射出角度を拡大するためのボールレンズを設置した。予備実験において、ターゲットを固定した場合の2つのPSDで測定されるレーザー光の変位の相関関係を計測した。前述のレーザー光射出方向に変動があれば、2つのPSD上では同様の変位が得られるはずであるが、測定結果では図10のように、Z方向では2つの変位間の相関が見られたが、Y方向では2つの変位の間には明確な相関が得られなかった。原因としては、射出角度の変動が予想より小さく、それよりも各光学素子を固定している器具類の熱的膨張などが支配的になったためと推察する。今後は、光学素子を固定する器具の熱膨張を抑える工夫、例えば器具類の寸法を小さくする、低熱膨張材料を用いるなどの検討を行う予定である。

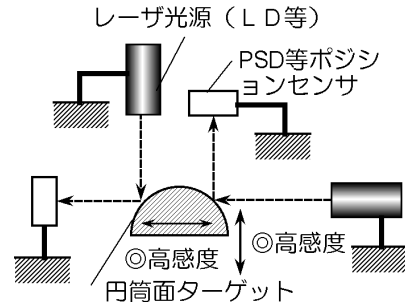


図6 円筒面ターゲットによる二次元変位計測

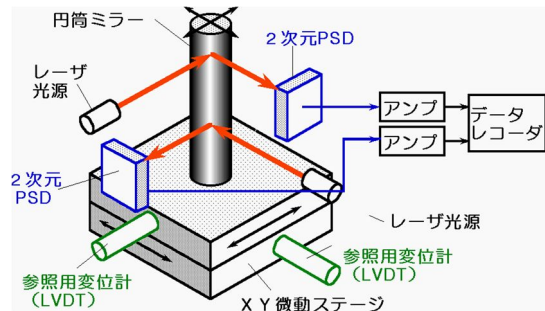


図7 2自由度並進微小変位計測実験装置の概念

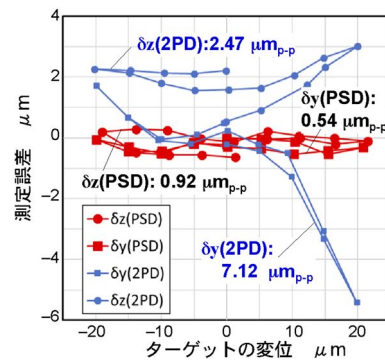


図8 2自由度並進微小変位計測結果

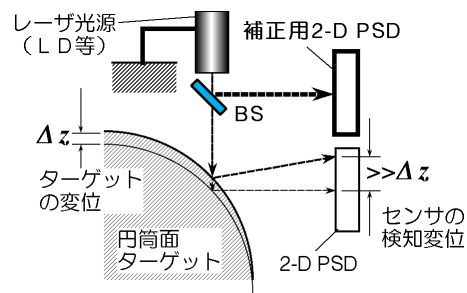
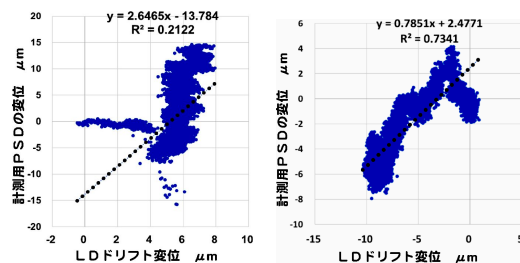


図9 レーザビームのゆらぎの計測方法



(a)Y方向 (b)Z方向

図10 レーザビームゆらぎの測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------